استفاده از آزمون غیرمخرب جریان گردابی برای کنترل کیفی قطعات کربن‌دهی شده*

مهرداد کاشفی[۱] میثم شیخ امیری[۲] محمود رضا قندهاری[۳]

چکیده

کربن‌دهی قطعات صنعتی از جنس فولاد کم کربن با هدف بهبود عمل‌کرد آن‌ها، کاری رایج به‌شمار می‌آید. کنترل دقیق درصد کربن سطح قطعات کربن‌دهی شده، مهم‌ترین عامل در رسیدن به خواص مورد نظر است. روش‌های متفاوتی برای تعیین درصد کربن سطح فولاد وجود دارند، امّا همه‌ی آن‌ها زمان‌بر و پرهزینه‌اند. افزون بر این، امکان آزمودن همه‌ی نمونه‌ها در آن‌ها وجود ندارد. در این پژوهش، کارایی روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین درصد کربن سطح فولاد بررسی و اثبات شد. آزمون جریان گردابی به‌منظور بررسی ارتباط بین ولتاژ ورودی و خروجی و امپدانس نرماله شده با درصد کربن انجام گرفت، و نتایج حاصل نشان‌گر ارتباط خوب بین امپدانس نرماله شده‌ی به‌دست آمده از آزمون جریان گردابی با درصد کربن سطح قطعات بود. بیش‌ترین ضریب همبستگی برای تعیین درصد کربن برابر با $R^2=0.82$ به‌دست آمد. آزمون جریان گردابی در سه دمای متفاوت انجام شد و با استفاده از نتایج آن، رابطه‌ای برای تعیین دقیق‌تر درصد کربن سطح فولاد در دماهای متفاوت ارایه شد.

واژه‌های کلیدی آزمون جریان گردابی، امپدانس نرماله شده، ولتاژ.

The Use of Eddy Current Nondestructive Test for the Quality Control of Carburized Components

M. kashefi M. Shaykh Amiri M.R. Ghandehari

Abstract

Carburization is a common way to improve the performance of low carbon steel components used in industries. Accurate control of surface carbon content of carburized steels is the most important factor for the obtainment of desirable properties. A variety of methods exists for determination of surface carbon content, however, all of them are expensive and time consuming, and accordingly, all the samples cannot be tested. In this research, the capability of Eddy Current nondestructive method for determination of surface carbon content of steel components was evaluated. The Eddy Current tests were performed in order to determine the relationship between the surface carbon content and the normalized impedance, the input and output voltages. The results showed an appropriate relationship (with $R^2=0.82$) between the surface carbon content and the normalized impedance. Moreover, the effect of test temperature on the mentioned relationship was also investigated. The relationship obtained in this way was suitable for the determination of the surface carbon content of the steel in a more accurate fashion.

Key Words Eddy Current Testing, Normalized Impedance, Voltage.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۲/۲۲ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۸۹/۶/۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسوول: استادیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

امروزه کاربرد روش‌های غیرمخرب تنها به بازرسی عیب‌ها و ترک‌یابی محدود نمی‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به توانایی‌ها و مزیت‌هایی که روش‌های غیرمخرب در تولید صنعتی دارند، تعیین خواص متالورژیکی مواد و به‌دست آوردن نتایج آزمون‌های مخرب با روش‌های غیرمخرب مورد توجه قرار گرفته است. این کار می‌تواند باعث صرفه جویی در هزینه و زمان تولید قطعات صنعتی شود. از این میان، آزمون غیرمخرب جریان گردابی مزیت‌های منحصر به‌فردی دارد که باعث تمایز آن از دیگر آزمون‌های غیرمخرب در تعیین خواص متالورژیکی مواد شده است. حساسیّت این آزمون به تغییر ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی (مانند سختی) را می‌توان جزو مهم‌ترین عواملی دانست که باعث توجه بسیاری از محقّقان به این روش شده است [1].

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی بررسی خواص متالورژیکی مواد به‌کمک روش جریان گردابی انجام شده است. کُنوپلیوک در تحقیق خود بر روی چدن نشکن، ارتباط خوبی بین سختی و ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی به‌دست آورده است[3]. یوچیمُتو و سِک در پژوهشی دیگر همین ارتباط را برای چدن خاکستری و تأثیر ضریب دورشدگی بر روی این ارتباط را نشان داده‌اند [4,5]. عمق لایه‌ی کربن‌زدایی شده توسط مِرسیر و به‌کمک روش تحلیل هارمونیک تعیین شده و دقّت آن با روش‌های مشابه سختی سنجی و متالوگرافی مقایسه شده است [6]. خان ارتباط بین پاسخ جریان گردابی و درصد پرلیت فولاد را بررسی کرده است [7]. افزون بر این، مارتینز فرایند بازیابی و تبلور مجدد را با این روش تحلیل کرده و دقّت آن را در تعیین مراحل بازیابی و تبلور مجدد اثبات کرده است [8]. فرایند رسوب سختی در فولاد مارایجینگ نیز به‌وسیله‌ی راج‌کومار بررسی شده و تمامی مراحل رسوب‌گذاری در آن به‌کمک پاسخ جریان گردابی تحلیل شده است [9]. تحقیقاتی هم بر روی فلزات غیر آهنی انجام شده است. ناتان و رُزن فرایند رسوب‌گذاری و پیرسختی را در آلیاژهای آلومینیم بررسی کرده‌اند [10]، و کانِرث تغییرات ساختاری و تشکیل فازها را حین انجماد در سرب و آلیاژی از سرب- قلع به‌کمک روش جریان گردابی اثبات کرده است [12]. جُپن نیز تحولات ساختاری در آلیاژ آلومینیم را حین فرایند عملیات حرارتی بررسی کرده است [13]. افزون بر این، وِست کَمپ میزان پتانسیل کربن در کوره‌ی کربن‌دهی گازی را با این روش تعیین کرده است [14].

با توجه به توانایی‌های ذاتی روش بررسی غیرمخرب جریان گردابی، کاربردهای متنوع دیگری از آن را در آینده می‌توان انتظار داشت.

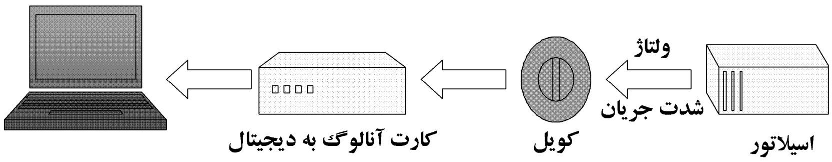
در این پژوهش سعی شده است تا کاربرد جدیدی از روش غیرمخرب جریان گردابی ارایه شده و توانایی آن در تعیین درصد کربن در سطح فولاد کربن‌دهی شده بررسی و اثبات شود.

تهیه‌ی نمونه و انجام آزمون‌ها

در این پژوهش از فولاد AISI ٤١١٨ که برای فرایند کربن‌دهی مناسب است، استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (١) آورده شده است. ١٦ نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر ٢/٥ سانتی‌متر و ارتفاع ١٥ سانتی‌متر انتخاب شدند و عملیات کربن‌دهی سطحی با استفاده از کوره‌ی کربن‌دهی گازی مدل SIB210 انجام شد. دما و زمان کربن‌دهی برای تمام نمونه‌ها به‌ترتیب ٩٠٠°C و ٨ ساعت انتخاب شد. پتانسیل کربن کوره بین ٠/٤ تا ٠/٩ متغییر انتخاب شد تا به این ترتیب نمونه‌هایی با درصد کربن متفاوت در سطح آن‌ها تولید شوند. پس از کربن‌دهی، تمام نمونه‌ها در هوا سرد شدند، و سپس به‌روش القایی نرماله شدند. با استفاده از نمونه‌های نرماله شده، یک نمونه‌ی قرص شکل برای انجام آزمون کوانتومتری و یک نمونه هم برای انجام آزمون جریان گردابی تهیه شد. تصویری شماتیک از مجموعه دستگاه جریان گردابی در شکل (١) نمایش داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد AISA 4118 مورد استفاده در این پژوهش

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
0.196	0.25	0.75	0.02	0.008	0.8	0.18	0.06	0.01	Rest



شکل ۱ تصویری شماتیک از مجموعه دستگاه جریان گردابی مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۲ درصد کربن سطح در نمونه‌های کربن‌دهی شده که به‌روش کوانتومتری اندازه‌گیری شده‌اند

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
درصد کربن سطح نمونه‌ها	0.83	0.45	0.53	0.71	0.81	0.88	0.68	0.65	0.91	0.72	0.88	0.74	0.78	0.44	0.55	0.88

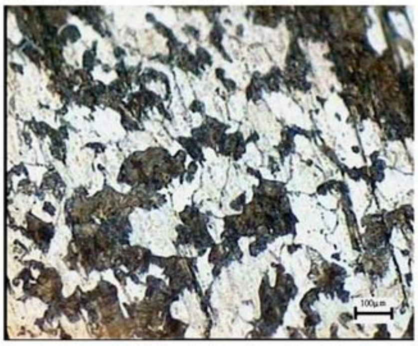
آزمون جریان گردابی با هدف تعیین فرکانس بهینه در گستره‌ی فرکانس ۶۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز انجام شد. تمامی نمونه‌ها در دمای $30\ ^\circ C$ و با سیم‌پیچی به ضریب پرشدگی ۰/۹۶ بررسی شدند. برای حذف اثرات لبه‌ای، سیم‌پیچ به گونه‌ای طراحی شد تا طول آن به‌میزان ۲ سانتی‌متر از طول نمونه کوتاه‌تر باشد.

آزمون جریان گردابی در دماهای $0\ ^\circ C$ و $80^\circ C$ نیز تکرار شد و تأثیر آن بر روی نتایج بررسی شد.

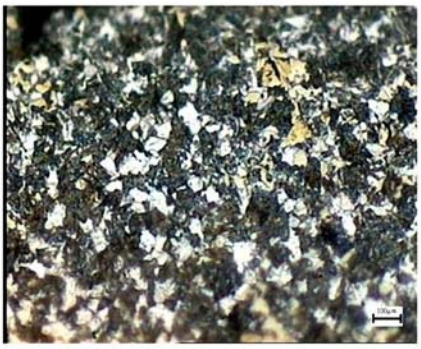
نتایج, بحث و بررسی

درصد کربن سطح که به‌روش کوانتومتری به‌دست آمده است، در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، درصد کربن سطح نمونه‌ها بین ۰/۴۴ تا ۰/۹۱ متغییر است.

شکل (۲) تصویر متالوگرافی از سطح دو نمونه با بیش‌ترین و کم‌ترین درصد کربن سطح را نشان می‌دهد که در آن‌ها میزان پرلیت با افزایش درصد کربن سطح افزایش یافته است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ تصویرهای متالوگرافی از سطح نمونه‌های کربن‌دهی شده با کم‌ترین (الف) و بیش‌ترین (ب) درصد کربن سطح

عملیات حرارتی نرماله‌سازی به‌روش القایی با این هدف انجام شد که از کربن‌زدایی سطح جلوگیری شود. در روش القایی، زمان آستنیته شدن نمونه‌ها بسیار کوتاه است و در نتیجه، کربن‌زدایی به حداقل می‌رسد. از دو روش فرمول عمق نفوذ استاندارد، و برون‌یابی نتایج و تعیین ضریب همبستگی (R^2) برای تعیین فرکانس بهینه استفاده شد [1,2]. با این دو روش، فرکانس ٦٥٠ هرتز برای تعیین درصد کربن سطح نمونه‌ها انتخاب شد.

ولتاژ یکی از عواملی است که با انجام آزمون جریان گردابی به‌دست می‌آید. ولتاژ ورودی و خروجی را می‌توان مستقیماً از ورودی و خروجی سیم‌پیچ اندازه‌گیری و ثبت کرد.

امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) عامل دیگری است که با انجام آزمون جریان گردابی به‌دست می‌آید. برای محاسبه‌ی این عامل، ولتاژ (V) و شدت جریان (I) به‌دست آمده از سیم‌پیچ ثبت شد، و امپدانس سیم‌پیچ (Z) مربوط به هر نمونه با استفاده از رابطه‌ی ١ محاسبه شد.

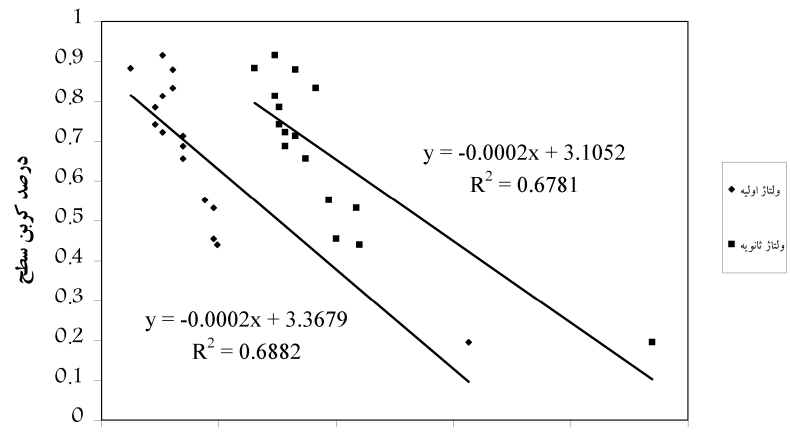
$$Z = V/I \qquad (1)$$

با تقسیم امپدانس سیم‌پیچ مربوط به هر نمونه (Z) بر امپدانس سیم‌پیچ خالی (Z_0)، امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) به‌دست آمد.

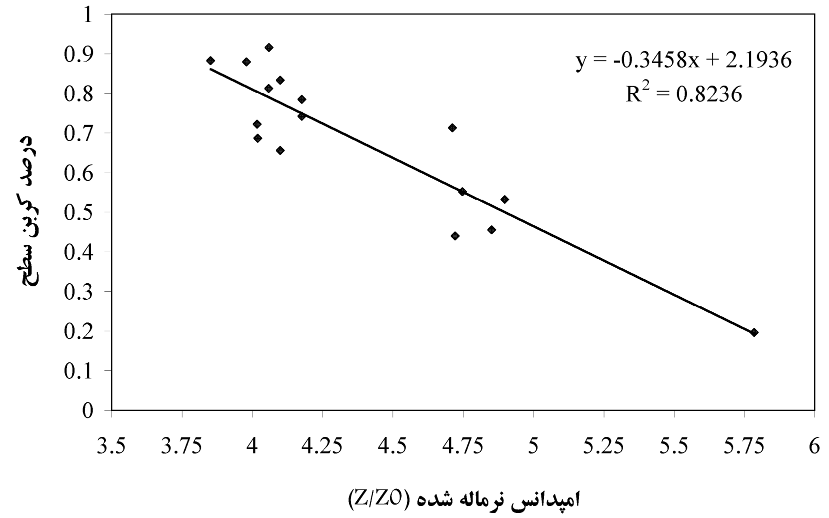
پس از اندازه‌گیری و محاسبه‌ی عوامل فوق برای همه‌ی نمونه‌ها، رابطه‌ی بین درصد کربن با امپدانس نرماله شده و ولتاژ ورودی و خروجی بررسی شد.

شکل (٣) ارتباط بین درصد کربن سطح فولاد را با ولتاژ ورودی و خروجی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی (R^2) ذکر شده برای هر دسته از نتایج نشان‌دهنده‌ی ارتباط مناسب بین ولتاژ ورودی و خروجی با درصد کربن سطح می‌باشد، امّا امپدانس نرماله شده برای یافتن رابطه‌ی بهتر محاسبه شد. ارتباط بین درصد کربن سطح فولاد با امپدانس نرماله شده در شکل (٤) آورده شده است.

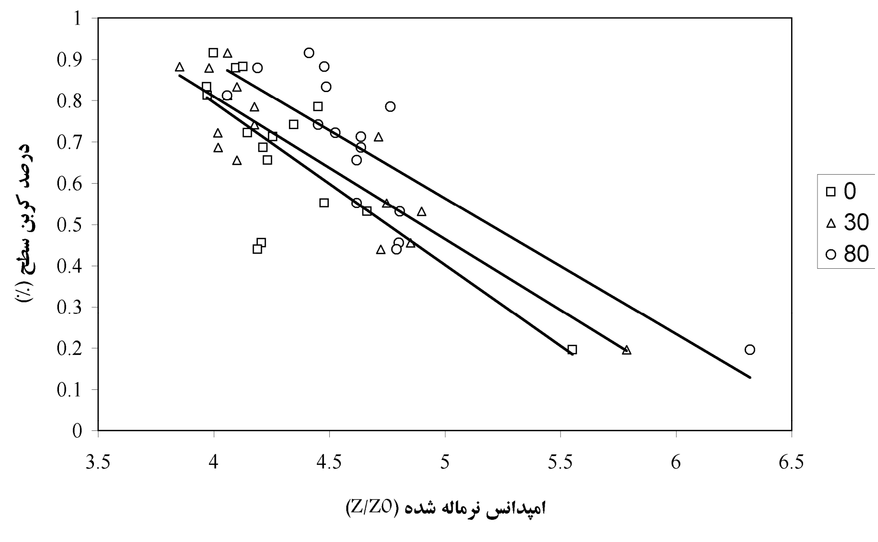
همان‌گونه که مشاهده شد، ارتباط بین عوامل آزمون با استفاده از روش برون‌یابی و ضریب همبستگی (R^2) بررسی شد. ضریب همبستگی ٠/٨٢ برای ارتباط بین درصد کربن سطح با امپدانس نرماله شده به‌دست آمد. بالا بودن ضریب همبستگی (R^2) نشان‌دهنده‌ی توانایی خوب روش جریان گردابی برای تعیین درصد کربن سطح فولاد و استفاده از آن در پیش‌بینی درصد کربن سطح است.



شکل ٣ ارتباط بین درصد کربن سطح فولاد با ولتاژ اولیه و ثانویه



شکل٤ ارتباط بین درصد کربن سطح فولاد با امپدانس نرماله شده



شکل ۵ تغییرات درصد کربن سطح فولاد با امپدانس نرماله شده در سه دمای ۰ °C، ۳۰ °C و ۸۰ °C

پاسخ جریان گردابی به ریزساختار وابسته است، و ریزساختار نیز تابعی از ترکیب شیمیایی نمونه است. اگر عملیات حرارتی و سرعت سرد شدن همه‌ی نمونه‌ها یک‌سان باشد، ارتباطی را می‌توان بین ترکیب شیمیایی و پاسخ جریان گردابی جستجو کرد.

همان‌طور که در شکل‌های (۳) و (٤) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد کربن سطح ولتاژ ورودی و خروجی و امپدانس نرماله شده کاهش می‌یابند. علت این روند را می‌توان به افزایش درصد پرلیت با افزایش درصد کربن فولاد نسبت داد.

امپدانس سیم‌پیچ یک بردار موهومی است که از ترکیب دو عامل مقاومت حقیقی (R) و ظاهری (X) به‌دست می‌آید:

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2} \quad (٢)$$

با افزایش درصد کربن و میزان پرلیت در فولاد، مقاومت حقیقی (R) افزایش و مقاومت ظاهری (X) کاهش می‌یابد. در فلزات فرومغناطیس مانند فولاد، کاهش X بسیار بیش‌تر از افزایش R است. بنابراین امپدانس سیم‌پیچ (Z) و به طبع آن (Z/Z_o) با افزایش میزان پرلیت کاهش می‌یابند. از سوی دیگر، مطابق رابطه‌ی ۱، مشاهده می‌شود که امپدانس (Z) با ولتاژ (V) رابطه‌ی مستقیمی دارد، بنابراین با کاهش امپدانس ولتاژ نیز کاهش می‌یابد.

همه‌ی نتایج ذکر شده از انجام آزمون جریان گردابی در دمای ۳۰ °C به‌دست آمده‌اند. دما عاملی مؤثر در دقّت نتایج آزمون جریان گردابی است. با این‌حال، بازرسی در محیط‌های صنعتی ممکن است در دماهای دیگری انجام گیرد. به‌همین دلیل و نیز به منظور بررسی تأثیر دما و یافتن رابطه‌ای قابل کاربرد در دماهای متفاوت، آزمون جریان گردابی در دماهای‌ °C ۰ و ۸۰ °C نیز تکرار شد. از آنجا که امپدانس نرماله شده در مقایسه با ولتاژ ورودی و خروجی رابطه‌ی بهتری با درصد کربن سطح دارد، نمودار تغییرات درصد کربن سطح فولاد بر حسب امپدانس نرماله شده در دماهای متفاوت در شکل (۵) ترسیم شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در این شکل می‌توان دریافت که امپدانس نرماله شده با افزایش دما افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۳) توضیح داد. مقاومت حقیقی ماده (R) با افزایش دما افزایش می‌یابد [1,2]، ولی در دماهای نزدیک به دمای اتاق تغییر چندانی در مقدار مقاومت ظاهری ماده (X) دیده نمی‌شود [1,2]. بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۳)، امپدانس ماده و به‌دنبال آن امپدانس نرماله شده با افزایش دما افزایش می‌یابند.

با استفاده از روش برون‌یابی و به‌دست آوردن ارتباط بین درصد کربن سطح فولاد با امپدانس نرماله شده، رابطه‌ی به‌دست آمده را می‌توان برای تعیین دقیق‌تر درصد کربن در دماهای مختلف تعمیم داد.

$$\%C = (-2\times10^{-5}T^2 + 0.0021T - 0.394)(Z/Z_o) + (8\times10^{-5}T^2 - 0.0083T + 2.3722) \quad (٣)$$

عبارت‌های T، Z/Z_o و %C در رابطه‌ی (۳) به‌ترتیب دما، امپدانس نرماله شده و درصد کربن سطح فولاد می‌باشند.

به‌کمک این رابطه و با داشتن امپدانس نرماله شده و دمای آزمون، درصد کربن سطح قطعه‌ی کربن‌دهی شده را می‌توان با دقّت بالایی به روش غیرمخرب تعیین کرد.

نتیجه‌گیری

کاربرد جدیدی از روش غیرمخرب جریان گردابی در این پژوهش ارایه شد و به‌کمک آن درصد کربن سطح فولاد AISI 4118 کربن‌دهی شده به‌صورت کمّی بررسی شد. برای یافتن بهترین رابطه‌ی بین درصد کربن سطح فولاد با ولتاژ ورودی و خروجی و امپدانس نرماله شده، از روش برون‌یابی استفاده شد. بالاترین ضریب همبستگی ($R^2 = 0.82$) برای رابطه‌ی بین درصد کربن سطح فولاد و امپدانس نرماله شده به‌دست آمد. افزون بر این، آزمون جریان گردابی در سه دمای ۰ °C، ۳۰ °C و ۸۰ °C تکرار شد و با استفاده از نتایج به‌دست آمده، رابطه‌ای برای تعیین

دقیق‌تر درصد کربن سطح فولاد در دماهای مختلف ارایه شد.

مراجع

1. Bray, D.E., Stanly, R.K., "Nondestructive Evaluation", CRC, (1997).
2. Hagemair, D.J., "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, (1990).
3. Konoplyuk, S. et al., "Characterization of ductile cast iron by eddy current method", NDT&E International, (2005).
4. Uchimoto ,T. et al., "Eddy current evaluation of cast irons for material characterization", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2003).
5. Cech, J., "Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods", NDT International April (1990).
6. Mercier, D. et al., "Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing", NDT&E International, (2006).
7. Khan, S.H. et al., "Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method", *Journal of Materials Processing Technology*, (2007).
8. Martinez-de-Guerenu, A. et al., "Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2007).
9. Rajkumar, K.V. et al., "*Characterization of aging behaviour in M250 grade Maraging steel using eddy current nondestructive methodology*", Materials Science and Engineering A, (2006).
10. ROSEN, M., "Eddy Current Analysis of Precipitation Kinetics in Aluminum Alloys", Metallurgical Transactions A, (1989).
11. Natan, M. et al., "Relationship between microstructure, hardness and electrical conductivity of 2219 aluminium", *Journal of Materials Science*, (1983).
12. Kunerth, C.D. et al. "Eddy Current Study of Solidification in Lead and Lead 20 Pct Tin", Merallorgical Ransactions B, (1980).
13. Vetterlein, J. et al., "Eddy Current Testing at High Temperatures for Controlling Heat TreatmentProcesses", International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, (2003).
14. W. Klümper, et al., "Non-destructive determination of the carbon content in iron foils- A quality

assurance of the gas carburising process", International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, (2003).